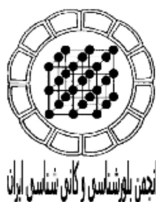
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران


انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و چهارم، شمارهٔ اول، بهار ۹۵، از صفحهٔ ۵۷ تا ۷۰

کانی‌شناسی و زمین‌شیمی کلینکر، سیمان پرتلند و گرد و غبار تولید شده درکارخانه سیمان نکاء و اثرهای زیست‌محیطی آن در استان مازندران

مهدی مهدوی آکردی*[۱]، مصطفی رقیمی[۱]، غلامحسین شمعانیان[۱]، محسن قلی پور[۲]

۱-گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان

۲- عضو پژوهشی جهاد دانشگاهی، گلستان

(دریافت مقاله: ۹۳/۱۱/۱۵، نسخه نهایی: ۹۴/۲/۳۰)

چکیده: سیمان پرتلند از گرما دادن مواد خام اولیه (سنگ آهک، خاک رس) در دمای حدود ۱۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد که تشکیل کلینکر را می‌دهد، تولید می‌شود. بررسی کانی‌شناسی و زمین‌شیمی کلینکر، سیمان پرتلند نکاء، غبار کوره سیمان و غبار آسیاب سیمان با میکروسکوپ پقطبشی، پراش پرتوایکس و فل‌یورسانی پرتو ایکس انجام شد. در نمودار سیستم فازی (- CaO - Al_2O_3 - SiO_2) ترکیب‌های شیمیایی کلینکر در مثلث C_3S - C_2S - C_3A قرار می‌گیرند. رس‌ها به علت جذب سطحی و تبادل یونی بالا بیشترین سهم در ورود عناصر جزئی و فلزات سنگین را به کلینکر سیمان نکاء دارند. بر اساس روابط بوگه، کلینکر و سیمان پرتلند نکاء با استاندارد بین المللی سیمان همخوانی دارد. از غبار کوره سیمان نکاء می‌توان به عنوان مواد اولیه سیمان استفاده کرد. بررسی کانی‌شناسی کلینکر و سیمان پرتلند حاکی از وجود کانی‌های سیلیکاتی کلسیم و میلیریت قهوه‌ای در کلینکر و کانی‌های سیلیکات‌های کلسیم (تری کلسیم سیلیکات، دی کلسیم سیلیکات)، لارنیت، گچ، میلیریت قهوه‌ای (تتراکلسیم آلومینوفریت) و کلسیت در سیمان پرتلند است. بررسی کانی‌شناسی غبار کوره سیمان و غبار آسیاب سیمان حاکی از وجود کانی‌های سیلیکات‌های کلسیم (تری کلسیم سیلیکات، دی کلسیم سیلیکات)، لارنیت، گچ و میلیریت قهوه‌ای (تتراکلسیم آلومینوفریت) در غبار آسیاب سیمان و کانی‌های کلسیت، کوارتز، موسکوویت – ایلیت و کلریت در غبار کوره سیمان است.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌شناسی؛ زمین‌شیمی؛ کلینکر؛ سیمان پرتلند؛ نکاء؛ غبار کوره سیمان؛ غبار آسیاب سیمان.*

مقدمه

سیمان یک چسباننده هیدرولیکی، غیرآلی، غیرفلزی و پودری است که پس از مخلوط شدن با آب خود را گرفته و در نتیجه فرایندهای شیمیایی با آب، سخت می‌شود و پس از سخت شدن مقاومت و پایداری خود را حتی در زیر آب نیز حفظ می‌کند [۱].

سیمان پرتلند در سال ۱۸۲۴ در انگلستان توسط جوزف آسپیدن که از گرما دادن مخلوط مصنوعی سنگ آهک و خاک رس به دست آمد و به ثبت رسید [۲]. سیمان‌ها در آیین نامه استاندارد اروپا به ۵ دسته رده بندی می‌شوند که شامل سیمان نوع I (پرتلند)، سیمان نوع II (سیمان پرتلند ترکیبی)، سیمان نوع III (سیمان آهن گدازی)، سیمان نوع IV (سیمان پوزولانی)، سیمان نوع V (سیمان ترکیبی) است [۳]. سیمان پرتلند یکی از سیمان‌هایی است که با گرما دادن یک مخلوط کاملاً نرم از سنگ آهک و شیل (یا خاک رس) در یک دمای بسیار زیاد ($1500^{o}C$) تولید می شود [۴]. سنگ آهک به عنوان ماده‌ی اصلی و مواد دیگر نظیر خاک رس، مارن، شیل و غیره را که تأمین کننده آلومینیم، آهن و سیلیس هستند،

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۳۷۳۲۵۰۶۱۴ ، نمابر: ؟؟؟؟؟، پست الکترونیکی: Mehdi_81217@yahoo.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]

با نسبت‌های معین مخلوط نموده و به عنوان ماده‌ی اولیه سیمان به کار می‌برند [۵-۷]. برهمکنش شیمیایی مواد خام در دماهای ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد باعث به وجود آمدن گلوله‌های کوچک به رنگ سیاه قهوه‌ای با قطر ۱۲٫۵ میلیمتر به نام کلینکر می‌شود [۸]. ترکیبات تشکیل دهنده‌ی کلینکر شامل تری کلسیم سیلیکات یا آلیت (C_3S)، دی کلسیم سیلیکات یا بلیت (C_2S)، تری کلسیم آلومینات (C_3A) و تتراکلسیم آلومینوفریت (C_4AF) است [۹]. بررسی میکروسکوپی، روش بسیار مهمی برای شکل‌گیری کلینکر سیمان است. هر مرحله از فرآیندهای کارخانه سیمان می‌تواند با استفاده از نتایج بررسی‌های میکروسکوپی بهبود یابد. برخی از کارخانه‌های سیمان از روش میکروسکوپی برای کنترل کوره با نمونه‌برداری کلینکر استفاده می‌کنند. ویژگی‌های مهمی که با میکروسکوپ قابل توصیف‌اند عبارتند از ۱- کل ساختار میکروسکوپی گرهک‌ها، تراکم و روزنه‌ها، تراکم ریزگرهک‌ها ۲- اندازه‌ی بلورهای آلیت ۳- اندازه‌ی بلور بلیت. اندازه‌ی بلورهای درشت بلیت نشان دهنده‌ی زمان طولانی‌تر در ناحیه گداخته شدن است [۱۰]. غباری که در مرحله‌ی تولید کلینکر از کوره خارج می‌شود غبار کوره‌ی سیمان (CKD)[1] نام دارد و ظاهر آن پودر خاکستری یا سفید است [۱۱]. غبار کوره سیمان به علت دارا بودن مقداری از قلیایی‌های ($Na_2O + K_2O$) و ترکیبات سولفوره‌ی بالا قابل برگشت به چرخه‌ی تولید سیمان نیست به همین دلیل مهم‌ترین ماده‌ی غیرقابل استفاده در صنعت سیمان به شمار می‌رود. به‌طور کلی اگر مقدار قلیایی‌های موجود در غبار کوره کمتر از ۱ درصد باشد، می‌توان کل غبار را به کوره باز گرداند [۱۲]. غبار آسیاب سیمان غباری است که در مرحله‌ی تولید سیمان از آسیاب سیمان خارج می‌شود و ظاهر آن به صورت پودری خاکستری است [۱۳]. غبار کوره‌ی سیمان و غبار حاصل از آسیاب کردن سیمان جزء مواد ذره‌ای است. حدود ۶۰ درصد غبار کوره‌ی سیمان شامل ذراتی با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۱۰ میکرون (PM_{10}) و قابل استنشاق تا حنجره است. ۴۰ درصد غبار کوره سیمان شامل ذراتی با قطر آئرودینامیکی کمتر از ۲٫۵ میکرون ($PM_{2/5}$) است که می‌تواند با تنفس تا شش‌ها نفوذ کنند [۱۴]. لذا هدف از این بررسی کانی‌شناسی و زمین‌شیمی کلینکر، سیمان پرتلند و گرد و غبار تولید شده درکارخانه سیمان نکاء و اثرهای زیست محیطی آن در منطقه است.

مشخصات منطقه مورد بررسی

منطقه‌ی مورد بررسی در البرز مرکزی، گرگان- رشت واقع شده است [۱۵]. کارخانه‌ی سیمان نکاء با موقعیت جغرافیایی ″۳ '۲۰ °۵۳ طول شرقی و ″۱۷ '۳۸ °۳۶ عرض شمالی در ۲٫۵ کیلومتری جنوب شرقی نکاء و نزدیک به روستای آبلو در منطقه‌ی معتدل و مرطوب قرار گرفته است. این کارخانه در سال ۱۳۶۰ مورد بهره برداری قرار گرفت. دو نوع محصول در کارخانه سیمان نکا به روش خشک؛ شامل سیمان پرتلند نوع دو (مقاوم در برابر سولفات‌ها) و سیمان پرتلند نوع یک (سیمان پرتلند معمولی) تولید می‌شود. مواد اولیه مصرفی کارخانه، برای تولید روزانه ۷۲۰۰ تن سیمان در حدود ۱۲ هزارتن است. که شامل بلوک‌های سنگ‌های آهکی و ذخایر مواد آبرفتی و خاک رس است که به صورت ذخایر روباره‌ای، سطح بلوک‌های آهکی را پوشانده‌اند. مواد آهکی تأمین کننده‌ی کارخانه از معدن سنگ آبلودر نزدیک کارخانه تأمین می‌شود. ذخایر سنگ آهک، وابسته به یک واحد سنگی آهکی ضخیم لایه تا میان لایه از سازند لار (ژوراسیک فوقانی) با روند عمومی شمال غربی - جنوب شرقی و با شیب عمومی ۱۲ درجه به سمت شمال شرق است. که در این گستره حدود ۱۲۰ متر از ضخامت سازند لار بیرون زدگی داشته و تشکیل بلوک‌های سنگ آهک مورد بحث را داده است. لایه‌های سنگ آهک سازند لار در این منطقه از نظر چینه شناسی از دو بخش تحتانی و فوقانی تشکیل شده است. بخش تحتانی شامل سنگ آهک نازک لایه تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری تا کرم با آثاری از لایه‌های چرت و گرهک‌های سیلیس است. بخش فوقانی سنگ آهک در این منطقه بیشتر از بخش تحتانی، ذخایر سنگ آهک کارخانه را تشکیل می‌دهد که به صورت توده‌ای به رنگ زرد تا صورتی است که به دلیل عدم وجود لایه‌ها و گرهک‌های سیلیس و چرت، عیار بالایی دارد [۱۶]. روی لایه‌های سنگ آهک سازند لار در بلوک‌های معدنی مورد بحث، یک واحد سنگی متشکل از تناوب لایه‌های کنگلومرا، مارن، رس، ماسه سنگ و سنگ آهک به صورت دگرشیبی قرار گرفته‌اند که این رسوب‌ها، رسوب‌های دریاچه‌ای دوره‌ی پلیوسن و پلیوستوسن در این ناحیه است. ضخامت این رسوب‌ها آواری ثابت نیستند و در بعضی نقاط متجاوز از ۲۰ متر است. کل ساختار مورد بحث به وسیله‌ی

1- Cement Kiln Dust

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]

رسوب‌های رسی کواترنر با ضخامت نسبتاً زیاد پوشیده شده‌اند، که مجموع واحد رسی و واحد سنگی نئوژن، به صورت مواد روباره‌ای کل سطح فرسایش سازند لار را پوشانده و تشکیل ذخایر مواد اولیه تیتر پایین کارخانه (خاک رس) را داده‌اند [۱۶] (شکل ۱). خاک رس از بخش جنوبی کارخانه در زرندین سفلی یا از روی آهک‌های لار سنگ معدن آبلو، سنگ آهن از معادن حوزه شیخاب سمنان و سیلیس از شرکت تأمین ماسه و ریخته‌گری فیروزکوه و سنگ گچ از معادن سمنان و گرمسار تأمین می‌شود.

روش بررسی

برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی کلینکر، سیمان پرتلند و گرد و غبار آسیاب و کوره‌ی سیمان نمونه‌برداری در تابستان ۱۳۸۹ انجام شد. ۴ نمونه از کلینکر، سیمان پرتلند و گرد و غبار آسیاب و کوره سیمان برای پراش پرتو ایکس (XRD) و ۴ نمونه از کلینکر، سیمان پرتلند و گرد و غبار آسیاب و کوره سیمان برای فلوئوسانی پرتو ایکس (XRF) به شرکت کانساران بینالود ارسال شدند. برای بررسی کانی‌شناسی این نمونه‌ها از پراش سنج پرتو ایکس فیلیپس مدل PW1800 و برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی و برخی از عناصر جزئی از پراش سنج پرتوی ایکس فیلیپس مدل PW 2400 (با توان ۳۰۰۰ وات، ولتاژ ۶۰۰۰۰ ولت، جریان ۱۲۵ میلی آمپر، ۸ بلور پراش دهنده و ۳ ثبت کننده و تیوپ نوع رودیوم) استفاده شد. همچنین ۳۱ نمونه کلینکر و ۳۱ نمونه خوراک کوره به وسیله‌ی یک فلوئورسکوپ پرتو ایکس مدل S ARL ۸۶۸۰ کارخانه‌ی سیمان نکاء مورد بررسی قرار گرفتند. به منظور بررسی میکروسکوپی، ۳ مقطع صیقلی از کلینکر و سیمان پرتلند و ۱ مقطع نازک از کلینکر تهیه شدند. همچنین از روابط بوگه برای محاسبه‌ی ترکیب فازهای کلینکر و سیمان پرتلند بر اساس مقادیر حاصل از بررسی شیمیایی استفاده شد [۱۷] که شامل ضریب اشباع آهک (LSF) (رابطه‌ی ۱)، نسبت سیلیس (SR) (رابطه‌ی ۲)، نسبت آلومینیم (AR) (رابطه‌ی ۳)، مقدار تری کلسیم سیلیکات (C_3S) (رابطه‌ی ۴)، دی کلسیم سیلیکات (C_2S) (رابطه‌ی ۵)، تری کلسیم آلومینات (C_3A) (رابطه‌ی ۶) و تتراکلسیم آلومینوفریت (C_4AF) (رابطه‌ی ۷) است.

$$LSF = CaO / 2.80SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3$$ (رابطه‌ی ۱)

$$SR = SiO_2 / Al_2O_3 + Fe_2O_3$$ (رابطه‌ی ۲)

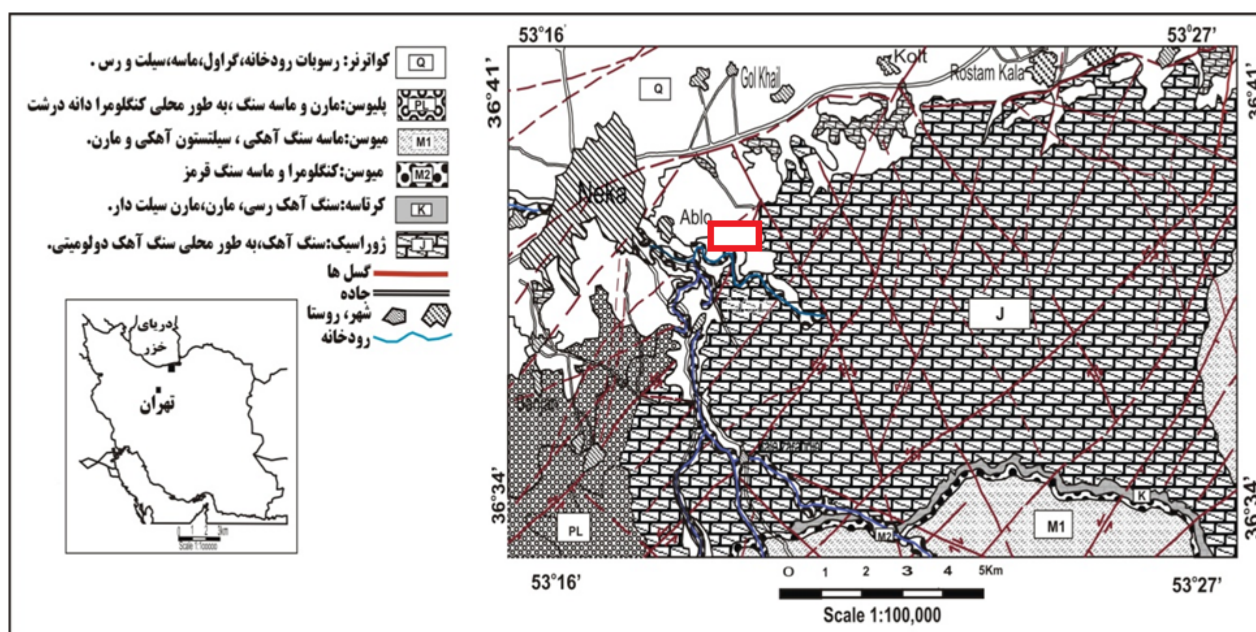
$$AR = Al_2O_3 / Fe_2O_3$$ (رابطه‌ی ۳)

$$C_3S = 4.071\ CaO - 7.6\ SiO_2 - 6.718\ Al_2O_3 - 1.430\ Fe_2O_3$$ (رابطه‌ی ۴)

$$C_2S = 8.6\ SiO_2 + 5.068\ Al_2O_3 + 1.079\ Fe_2O_3 - 3.071\ CaO$$ (رابطه‌ی ۵)

$$C_3A = 2.650\ Al_2O_3 - 1.692\ Fe_2O_3$$ (رابطه‌ی ۶)

$$C_4AF = 3.043\ Fe_2O_3$$ (رابطه‌ی ۷)



شکل ۱ موقعیت زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی (نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ساری).

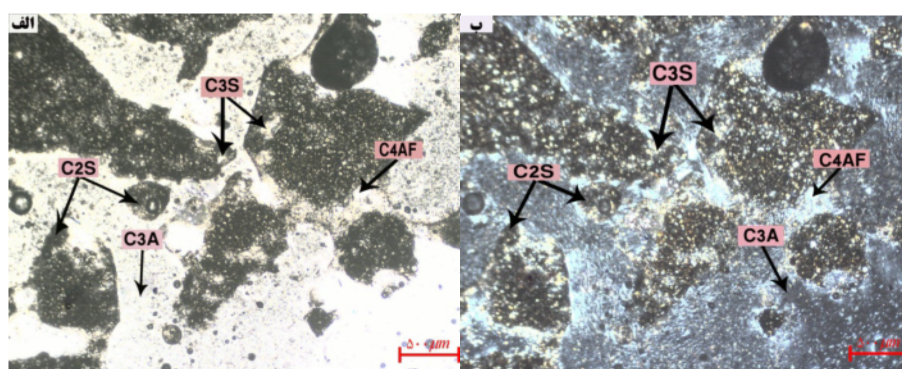
[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]

بحث و بررسی

کانی‌شناسی

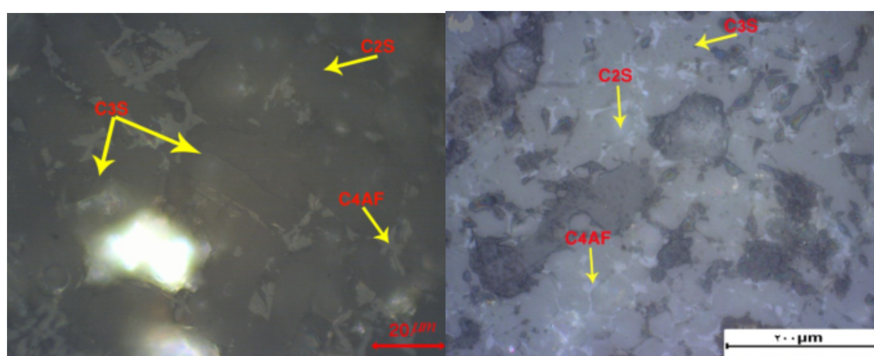
۱ –بررسی‌های میکروسکوپی

برای شناسایی کانی‌های تشکیل دهنده‌ی کلینکر در مقطع میکروسکوپی، از روش کمپل استفاده شد [۱۰]. در این روش کانی‌های تشکیل دهنده کلینکر از طریق تفاوت‌های رنگ در مقطع نازک مشخص می‌شوند. در مقطع نازک تری کلسیم سیلیکات به رنگ زرد، دی کلسیم سیلیکات به رنگ قهوه‌ای سیاه، تری کلسیم آلومینات به رنگ خاکستری و تتراکلسیم آلومینوفریت به رنگ سفید مشاهده می‌شوند (شکل ۲). در بررسی‌های میکروسکوپی مقطع صیقلی کانی‌های تشکیل دهنده‌ی کلینکر و سیمان از روی شکل شان مشخص می‌شوند [۱۸]. بلورهای آلیت منشوری، گاهی شبیه هشت وجهی و اغلب سطوحی واضح و قابل تشخیص دارند. بلیت به‌طور معمول به‌صورت بلورهای گرد دیده می‌شود، تری کلسیم آلومینات و تترا کلسیم آلومینوفریت بین فازهای آلیت و بلیت حل شده‌اند فاز تری کلسیم آلومینات به صورت بلورهای بلند و باریک گسترش می‌یابند. فاز تتراکلسیم آلومینو فریت از طریق بازتاب زیاد در مقطع صیقلی مشخص می‌شود [۱۸]. فازهای تشکیل دهنده‌ی کلینکر و سیمان پرتلند در مقاطع صیقلی در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. در کلینکر تولیدی کارخانه‌ی سیمان نکاء کلینکرهایی با هسته‌ی قهوه‌ای مشاهده شدند که به طور خلاصه عوامل زیر باعث قهوه‌ای شدن هسته کلینکر می‌شوند. ۱- دمای بالا ۲- محیط احیا کننده ۳- دانه‌های درشت کلینکر ۴- تخلخل کم پوسته [۱۹]. هر چه کلینکر درشت‌تر باشد احتمال روشن‌تر شدن رنگ هسته آن بیشتر است. تخلخل دانه‌های کلینکر و ابعاد آن بستگی به مدول سیلیس دارد. هر چه مدول سیلیس بالاتر باشد فاز مایع کمتر، و دانه‌های کلینکر ریزتر و دارای تخلخل بیشتری است. در کوره‌هایی که دانه بندی ریز است مدول سیلیس بالاست. در چنین کلینکرهایی هسته‌ی قهوه‌ای دیده نمی‌شود. کلینکرهای با هسته‌ی قهوه‌ای در کلینکرهای درشت دانه مشاهده می‌شود. به دلیل فاز مایع بالا، احتمال احیاء Fe_2O_3 و کاهش مقدار C_4AF بیشتر است (مشروط به دمای)، ولی با عبور کلینکر از شعله و رسیدن به فضای غنی از اکسیژن، احتمال برگشت FeO به Fe_2O_3 و تشکیل دوباره‌ی C_4AF فراهم و هر چه زمان بگذرد پوسته کلینکر سخت‌تر می‌شود و در نتیجه نفوذ اکسیژن به داخل آن مشکل‌تر خواهد شد [۱۹]. در صورتی‌که فاز مایع پایین و مدول سیلیس بالا باشد، تراکم دانه‌های کلینکر کمتر و ریزتر می‌شوند. در نتیجه در صورت وجود محیط احیا کننده و تبدیل اکسید فریک به اکسید فرو و کاهش فاز فریت، پس از عبور دانه‌های کلینکر از زیر شعله و رسیدن به فضای غنی از اکسیژن موجود در هوا، اکسیژن به راحتی از پوسته‌ی کلینکر به مغز آن می‌رسد و تمام کلینکر هم رنگ می‌شوند [۱۹]. پس از بررسی مقطع صیقلی تهیه شده از این نوع کلینکر، مشاهده شد که بلورهای آلیت و بلیت در هسته قهوه‌ای و به‌طور کامل تشکیل نشده و در حواشی آلیت بلورهای بلیت به‌وجود آمده‌اند. در حالی که در بخش پوسته که رنگ آن حالت کلینکر معمولی را دارد، بلورهای آلیت و بلیت به خوبی تشکیل شده‌اند (شکل ۵). این بررسی‌ها حاکی از آنند که علت قهوه‌ای شدن هسته‌ی بعضی از کلینکرهای تولیدی کارخانه‌ی سیمان نکاء، اندازه‌ی درشت آنهاست که یا به علت مدول سیلیس پایین، دمای بالا، محیط احیا کننده، و یا تخلخل کم پوسته است.

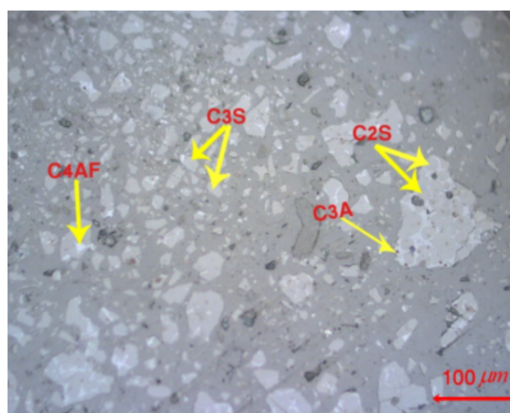


شکل ۲ مقطع نازک کلینکر، الف، در حالت (PPL) و ب، در حالت (XPL). دانه‌های زرد (C3S)، دانه‌های قهوه‌ای سیاه (C2S)، سفید (C4AF)، خاکستری (C3A).

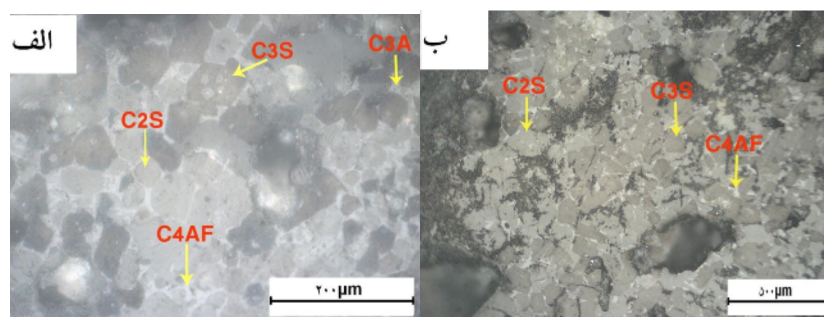
[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]



شکل ۳ مقطع صیقلی کلینکردر نور بازتابی (PPL)، دانه‌های کروی (C2S)، دانه‌های چند ضلعی (C3S)، خمیره C4AF و C3A.



شکل ۴ مقطع صیقلی سیمان پرتلند در نور بازتابی (PPL)، دانه‌های کروی (C2S)، دانه‌های چند ضلعی (C3S)، خمیره C4AF.



شکل ۵ مقطع صیقلی کلینکر هسته قهوه ای در نور بازتابی (PPL)، دانه‌های کروی (C2S)، دانه‌های چند ضلعی (C3S)، خمیره C4AF و C3A.

بررسی‌های پراش پرتو ایکس (XRD)

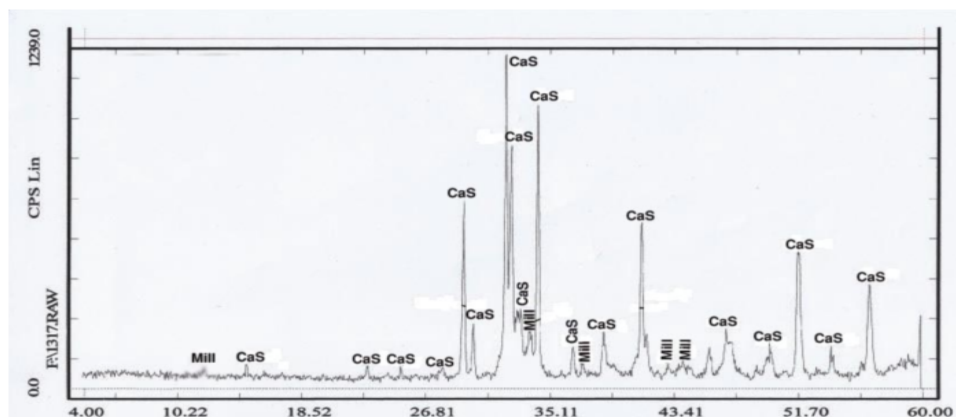
بررسی‌های انجام شده به روش پرتو ایکس (XRD) نشان داد که کانی‌های اصلی کلینکر کارخانه‌ی سیمان نکاء، عبارتند از سیلیکات‌های کلسیم (تری کلسیم سیلیکات و دی کلسیم سیلیکات) و کانی فرعی میلریت قهوه‌ای[۲] (تترا کلسیم آلومینوفریت) (شکل ۶). نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) از سیمان تولیدی کارخانه‌ی سیمان نکاء نشان داد که اکسید سیلیکات کلسیم منیزیم آلومنیوم (اکسیدهایی که در اثر پخت ناقص مواد اولیه‌ی سیمان در کوره تولید می‌شوند)، عبارتند از سیلیکات‌های کلسیم (تری کلسیم سیلیکات، دی کلسیم سیلیکات)، لارنیت[۳] به عنوان کانی‌های اصلی و کانی‌های ژیپس، براون‌میلریت (تتراکلسیم آلومینوفریت) و کلسیت به

2- Brown Millerite

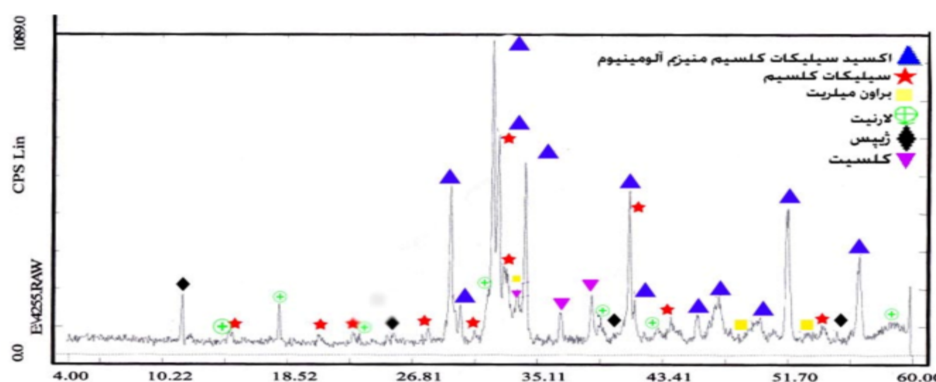
3- Ca_2SiO_3

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]

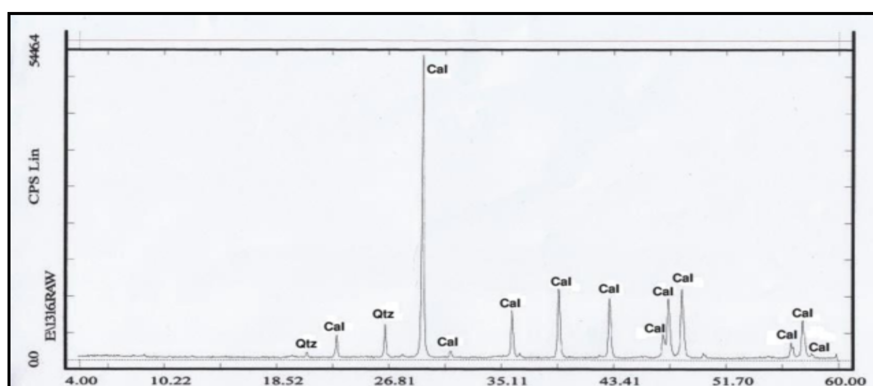
عنوان کانی‌های فرعی (شکل ۷). بنابر نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس (XRD)، غبار کوره کارخانه سیمان از کلسیت به عنوان کانی اصلی و کانی‌های کوارتز، موسکوویت – ایلیت و کلریت به عنوان کانی‌های فرعی تشکیل شده است (شکل ۸). نتایج پراش پرتو ایکس غبار آسیاب سیمان حاکی از وجود اکسید سیلیکات کلسیم منیزیم آلومنیوم (اکسیدهایی که در اثر پخت ناقص مواد اولیه‌ی سیمان در کوره تولید می‌شوند)، عبارتند از سیلیکات‌های کلسیم (تری کلسیم سیلیکات، دی کلسیم سیلیکات)، لارنیت به عنوان کانی‌های اصلی، و کانی‌های ژیپس و براون میلریت (تتراکلسیم آلومینوفریت) به عنوان کانی‌های فرعی (شکل ۹).



شکل ۶ پراش پرتو ایکس (XRD) کلینکر کارخانه سیمان نکاء. CaS= سیلیکات های کلسیم،Mill= براون‌میلریت.

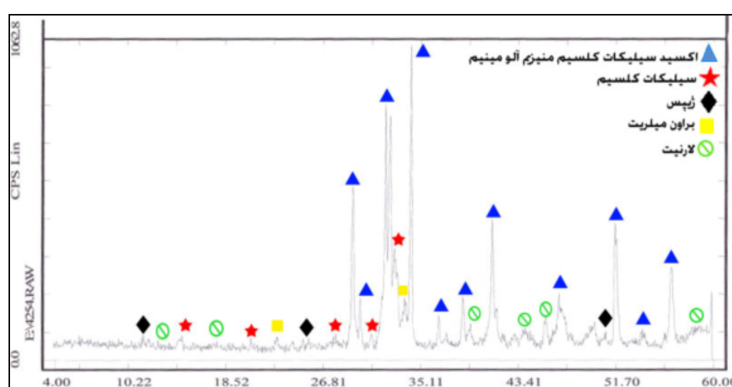


شکل ۷ پراش پرتو ایکس (XRD) سیمان نکاء.اکسید سیلیکات کلسیم منیزیم آلومنیوم (اکسیدهایی که در اثر پخت ناقص مواد اولیه‌ی سیمان در کوره تولید می‌شوند) و سیلیکات کلسیم (تری کلسیم سیلیکات، دی کلسیم سیلیکات) است.



شکل ۸ نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) غبار کوره سیمان نکاء. Cal = کلسیت،Qtz = کوارتز.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]



شکل ۹ نتایج پراش پرتو ایکس غبار آسیاب سیمان. اکسید سیلیکات کلسیم منیزیم آلومنیوم (اکسیدهایی که در اثر پخت ناقص مواد اولیه سیمان در کوره تولید می‌شوند) و سیلیکات کلسیم (تری کلسیم سیلیکات، دی کلسیم سیلیکات) است.

زمین‌شیمی

نتایج تجزیه‌ی شیمیایی اکسیدهای اصلی و برخی از عناصر جزئی وابسته به کلینکر، سیمان پرتلند و گرد و غبار کوره و آسیاب سیمان در جدول (۱) ارائه شده‌اند. در جدول‌های ۲ و ۳ میانگین نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی خوراک کوره و کلینکر ارائه شده‌اند. برای اطمینان از اینکه فازهای کانیایی مورد نیاز در اثر فرایند پخت تولید خواهند شد، محل ترکیب شیمیایی کلی مخلوط سنگ آهک و خاک رس در درون مثلث C_3S-C_2S-C_3A انتخاب می‌شدند. نسبتهای دو سنگ مورد نیاز برای تولید یک مخلوط ویژه را می‌توان با رسم خطی بین نقاط ترکیب شیمیایی آن‌ها و با استفاده از قانون اهرم به دست آورد. قرار گرفتن ترکیبات سیمان در این مثلث بیشترین اهمیت را دارد. از آنجا که این مثلث در مجاورت یک مثلث سه فازی قرار دارد که دارای CaO است، باید دقت زیادی شود تا از تشکیل CaO اضافی جلوگیری شود، زیرا هنگامی که این ترکیب آب جذب می‌کند تا پرتلندیت را تشکیل دهد، موجب انبساط ملات خواهد شد [۱۱] (شکل ۱۰). در این شکل از میانگین خاک رس و آهک برای نشان دادن موقعیت مخلوط استفاده شد. چنانکه نمودار نشان می‌دهد، مواد خام کارخانه‌ی سیمان نکاء به‌عنوان یکی از بهترین مواد برای تولید سیمان است. ترکیب فازهای تشکیل دهنده‌ی خوراک کوره معمولاً بر اساس مقادیر حاصل از تجزیه‌ی شیمیایی (جدول ۲) بنابر روابط بوگه محاسبه می‌شود [۱۷] که از این روابط می‌توان ضریب اشباع آهک (LSF) (رابطه‌ی ۱)، مدول سیلیس (رابطه‌ی ۲) (SR) و مدول آلومینیم (AR) (رابطه‌ی ۳) را به دست آورد.

ضریب اشباع آهک (LSF) نسبت مقدار واقعی CaO موجود در مخلوط مواد خام یا کلینکر سیمان به CaO_{max}، یعنی مقدار بیشینه‌ی CaO قابل پیوند با ترکیبات Fe_2O_3 ،Al_2O_3 ،SiO_2 در شرایط پخت و خنک کردن صنعتی، نشان می‌دهد[۱] (رابطه‌ی ۱). وقتی مقدار ضریب اشباع آهک، برابر ۱ باشد مقدار آهک دقیقاً با مقدار سیلیس، آلومینا و اکسید فریک در تعادل است. در صورتیکه بیشتر از ۱ باشد، موید آهک آزاد در کلینکرتولید شده است. اگر این مقدار پایین‌تر از ۱ باشد کلینکر تولیدی از دی کلسیم آلومینات غنی خواهد شد. که معمولاً به صورت در صد بیان می‌شود [۱۸]. نسبت سیلیس (SR)، نسبت وزنی دی اکسید سیلیس به مجموع مقادیر اکسید آلومینیم و اکسید آهن است (رابطه ۲). نسبت سیلیس بیانگر نسبت ترکیبات جامد به ترکیبات گدازه در ناحیه‌ی گداخته شدن کوره‌ی سیمان است. مقدار این ضریب معمولاً در دامنه‌ی ۴-۱٫۵ تغییر می‌کند. اما مطلوب‌ترین تغییرات آن بین ۲٫۸ -۲٫۳ است. نسبت آلومینا (AR)، نسبت وزنی اکسید آلومینیم به اکسید آهن است [۱۸]. با استفاده از این نسبت، اطلاعاتی در خصوص نسبت مقدار آلومینات کلسیم به کلسیم آلومینوفریت و در نتیجه ماهیت گدازه کلینکر به دست می‌آید (رابطه ۳). در کلینکر با ترکیب بهنجار، مقدار این نسبت بین ۴-۱٫۵ است. با در نظر گرفتن شرایط یکسان، نسبت آلومینا بین ۱٫۴ – ۱٫۶ سرشتی‌های یک پخت مطلوب را نشان می‌دهد [۱۸]. ترکیب فازهای تشکیل دهنده‌ی خوراک کوره در جدول (۴) نشان داده شد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]

جدول ۱ نتایج فلوئورسانی پرتو ایکس کلینکر، سیمان پرتلند، غبار کوره سیمان و غبار آسیاب سیمان، اکسیدهای اصلی (٪) و عناصر جزئی (ppm).

نمونه‌ها	کلینکر	غبار کوره سیمان	سیمان پرتلند	غبار آسیاب سیمان
SiO_2	۲۲٫۶۲	۱۲٫۰۲	۲۱٫۷۶	۲۲٫۶۰
Al_2O_3	۵٫۵۰	۳٫۴۰	۵٫۲۳	۵٫۶۰
Fe_2O_3	۳٫۶۴	۲٫۶۳	۳٫۰۵	۲٫۹۴
CaO	۶۵٫۶۲	۴۳٫۶۷	۵۴٫۹۱	۵۶٫۵۲
Na_2O	۰٫۱۹	۰٫۱۶	۰٫۸۰	۰٫۳۸
K_2O	۰٫۶۵	۰٫۶۹	۰٫۸۱	۰٫۹۰
MgO	۰٫۵۱	۰٫۹۱	۱٫۳۰	۱٫۲۹
TiO_2	۰٫۱۹۲	۰٫۲۰۸	۰٫۱۹۱	۰٫۱۹۹
MnO	۰٫۰۴۵	۰٫۰۵۱	۰٫۰۹۹	۰٫۰۷۹
P_2O_5	۰٫۱۴۶	۰٫۱۴۳	۰٫۲۱۳	۰٫۲۱۳
SO_3	۰٫۲۲	۰٫۰۰۵	۹٫۱۱۹	۶٫۶۵
L.O.I	۱٫۰۳	۳۵٫۶۹	۲٫۰۱	۲٫۰۳
Cl	۵۲	۲۷۱	۸۱	۹۴
Ba	۳۱	۵۲	۳۸	۲۴
Sr	۱۲۷	۱۲۹	۲۳۷	۲۹۰
Cu	۵۰	۱۴	۱۴	۱۶
Zn	۳۰	۳۵	۳۰	۲۹
Pb	۱۲	۸	۷	۶
Ni	۳۸	۴۰	۴۲	۴۱
Cr	۴	۹	۳	۸
V	۲۴	۳۰	۲۶	۲۴
Ce	۱۱	۱۲	۱۵	۱۹
La	۶	۵	۶	۹
Nb	۶	۳	۲	۱۲
Ga	۷	۶	۸	۹
Zr	۴۸	۴۵	۶۰	۶۱
Y	۱۰	۱۴	۱۳	۱۱
Rb	۲۲	۳۴	۲۹	۲۹
Co	۱	۴	۱	۲
As	۲۰	۲	۹۲	۴۰
Th	۳	۱۰	۴	۲

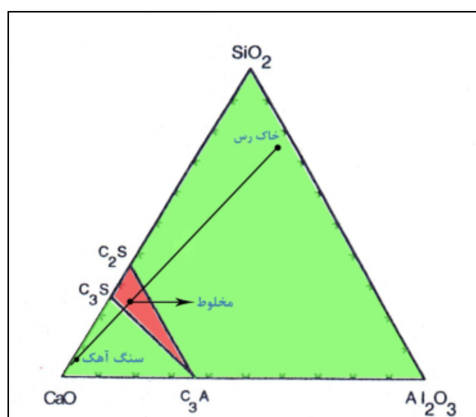
جدول ۲ میانگین نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی (٪) خوراک کوره کارخانه سیمان نکاء.

اکسیدها	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	L.O.I
مقادیر	۱۴٫۲۵-۱۴٫۶۹	۳٫۵-۴٫۰۹	۲٫۵۲-۲٫۲۵	۴۲٫۳۳-۴۱٫۲۵	۰٫۵۵-۰٫۵۶	۰٫۴۸-۰٫۵	۰٫۲-۰٫۲۱	۳۵٫۱۹-۳۵٫۵۰

جدول ۳ میانگین نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی (٪) کلینکر کارخانه سیمان نکاء.

اکسیدها	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
مقادیر	۲٫۵-۲۲٫۹۷	۵٫۳۲-۵٫۶۸	۲٫۷۲-۲٫۱۸	۶۵٫۵-۶۶	۰٫۵-۰٫۵۲	۰٫۶-۰٫۷	۰٫۴۱-۰٫۴۵	۰٫۸-۱٫۴

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]



شکل ۱۰ نسبت‌های سنگ آهک و خاک‌رس مورد نیاز برای تولید سیمان در کارخانه‌ی سیمان نکاء فاصله بین دو علامت در روی شکل است [۱۱].

جدول ۴ میانگین ترکیب فازهای تشکیل دهنده خوراک کوره کارخانه سیمان نکاء.

AR	SR	LSF	نسبت ها
۱٫۴۸-۱٫۷۳	۲٫۲۲-۲٫۴۶	۸۹٫۱۲-۹۱٫۴۵	مقادیر

با استفاده از نمودار فازی سیستم ($CaO - Al_2O_3 - SiO_2$) اجزای سازنده سیمان را می‌توان تعیین کرد. تعدادی از فازها در این سیستم قرار می‌گیرند، ولی فازهای مهم (C_3S، C_2S، C_3A) در داخل بخش محدودی از این نمودار، نزدیک گوشه‌ی CaO (آهک) تشکیل می‌شوند [۱۱]. در نمودار فازی (شکل ۱۱) ترکیبات شیمیایی شاخص برای کلینکر در گستره-ی مثلث C_3S-C_2S-C_3A قرار می‌گیرند که با معیارهای جهانی همخوانی دارد. تمام نمونه‌های کلینکر کارخانه سیمان نکاء در گستره‌ی مثلث یاد شده و بین مثلث $C_3S - C_2S - C_3A$ و دماهایی بین ۱۴۵۰ تا ۱۴۷۰ درجه‌سانتی‌گراد قرار می‌گیرند.

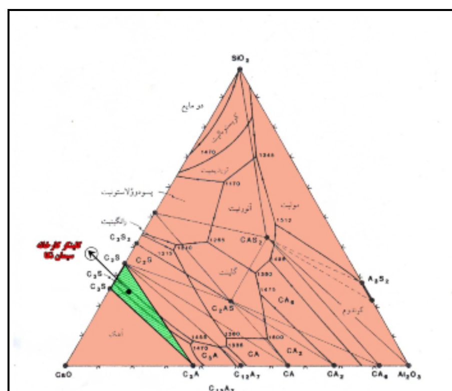
برای محاسبه فازها و ترکیبات تشکیل دهنده‌ی کلینکر، معمولاً بر اساس مقادیر حاصل از واکاوی شیمیایی (جدول ۲) از روابط بوگه استفاده می‌شود. در این بخش به بررسی ضریب اشباع آهک (LSF) بنابر رابطه‌ی (۱)، مدول سیلیس (SR) بنابر رابطه‌ی (۲) و مدول آلومینیم (AR) بنابر رابطه‌ی (۳) و ترکیبات تشکیل دهنده‌ی کلینکر پرداخته شد، برای یک کلینکر بهنجار مقدار LSF بین ۹۸-۹۲، SR بین ۳-۲ و AR بین ۴-۱ تغییر می‌کند [۲۰]. ترکیبات اجزای مرکب تشکیل دهنده‌ی کلینکر عبارتند از تری کلسیم سیلیکات (C_3S)، دی کلسیم سیلیکات (C_2S)، تری کلسیم آلومینات (C_3A) و تتراکلسیم آلومینوفریت (C_4AF) که بنابر روابط فوق محاسبه می‌شوند. در جدول (۵) فازها و ترکیبات تشکیل دهنده‌ی کلینکر کارخانه سیمان نکاء ارائه شده‌اند.

مقایسه‌ی ترکیبات اجزای مرکب تشکیل دهنده‌ی کلینکر کارخانه‌ی سیمان نکاء، با کلینکر سیمان پرتلند نوع II استاندارد اروپا و جهان و نیز کلینکر سیمان پرتلند نوع I استاندارد جهانی در جدول (۶) نشان داده شده‌اند. چنانکه مشاهده می‌شود با توجه به اینکه کلینکرهای مورد بحث کارخانه‌ی سیمان نکاء، کلینکر سیمان پرتلند نوع I است، مقدار تری کلسیم سیلیکات (C_3S)، دی کلسیم سیلیکات (C_2S)، تری کلسیم آلومینات (C_3A) و تتراکلسیم آلومینوفریت (C_4AF) در گستره‌ی استاندارد جهانی قرار دارند.

نسبت مولی سولفات به قلیایی‌ها به عنوان درجه‌ی سولفاتی شدن (DS) شناخته می‌شود. این نسبت درصد قلیا را که به صورت سولفات‌های قلیایی وجود دارد مشخص کرده و بنابر رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود، و مقادیر بر حسب درصد وزنی ارائه می‌شوند.

$$DS = 77.41\ SO_3 / [Na_2O + 0.658\ K_2O] \quad \text{(رابطه ۸)}$$

درجه سولفاتی شدن به میزان ۱۰۰٪ نشانگر آن است که قلیایی‌های موجود در کلینکر به‌طور کامل به سولفات قلیایی تبدیل شده‌اند. هرگاه درجه‌ی سولفاتی شدن بیش از ۱۰۰٪ باشد، به این معناست که کل گوگرد به سولفات‌های قلیایی تبدیل نشده است. لذا در این حالت گوگردهای اضافی تشکیل انیدرید بتا ($B-CaSO_4$) یا Ca-Langbeinite ($K_2SO_4.2CaSO_4$) می‌دهند [۱۹]. این مقدار برای کلینکر-های سیمان نکاء ۴۰-۱۵ است.



شکل ۱۱ روابط فازی در فشار یک اتمسفر در سیستم دی اکسید کربن بدون آب $C-A-S$، نشان دهنده‌ی موقعیت ترسیمی کلینکر کارخانه سیمان نکاءفاصله‌ی بین دو علامت روی شکل ۱۰ است [۱۱].

جدول ۵ فازها و ترکیبات اجزای مرکب تشکیل دهنده کلینکر کارخانه سیمان نکاء.

فازها و ترکیبات	C3S	C2S	C3A	C4AF	LSF	SR	AR
مقادیر	۵۰٫۴۶-۵۵٫۴۹	۲۲٫۷۳-۳۷٫۷۷	۸٫۱۳-۹٫۴۲	۱۰٫۰۴-۱۱٫۳۵	۸۹٫۷۰-۹۱٫۳۴	۲٫۴۷-۲٫۶۰	۱٫۴۵-۱٫۷۵

جدول ۶ مقایسه ترکیبات اجزای مرکب تشکیل دهنده‌ی کلینکر کارخانه‌ی سیمان نکاء با کلینکر سیمان پرتلند نوع II استاندارد اروپایی [۲۱] و جهانی [۹] و کلینکر سیمان پرتلند نوع I استاندارد جهانی[۱۱].

ترکیبات تشکیل دهنده کلینکر	C3S	C2S	C3A	C4AF
استاندارد اروپا تیپ II	۴۵ - ۶۵	۱۰ - ۳۰	۵ – ۱۲	۶ - ۱۲
استاندارد جهان تیپ II	۴۵ - ۶۵	۷ - ۳۰	۲ - ۸	۷ - ۱۰
استاندارد جهان تیپ I	۵۰ - ۷۰	۱۵ – ۳۰	۵ – ۱۰	۵ – ۱۵
کلینکر سیمان نکاء	۵۰ – ۵۶	۲۲ - ۲۸	۸ - ۱۰	۹ - ۱۲

میزان مواد اولیه مصرفی برای تولید کلینکر سیمان نکاء، شامل ۰٫۷ – ۰٫۷۳ آهک، ۰٫۲- ۰٫۲۳ خاک رس، ۰٫۰۲- ۰٫۰۱۵ سنگ آهن و ۰٫۰۵- ۰٫۰۴۵ سنگ سیلیس است. برای محاسبه-ی درصد سهم هر یک از مواد اولیه در محتوای عناصر جزئی کلینکر سیمان نکاء، در مرحله‌ی اول برای هر عنصر، با توجه به میزان مواد اولیه برای تولید کلینکر کارخانه سیمان نکاء، مجموع هر یک از عناصر ورودی ناشی از مواد اولیه به کلینکر را محاسبه کرده و در مرحله‌ی بعد بنابر رابطه‌ی (۹) درصد سهم هر یک از مواد اولیه در محتوای عناصر کلینکر کارخانه‌ی سیمان نکاء محاسبه می‌شود [۲۲](N) (جدول ۷)

(رابطه ۹)

$$N = \frac{\text{۱۰۰} \times \text{حاصلضرب غلظت هر یک از عناصر در هر یک از مواد اولیه}}{\text{مجموع غلظت عناصر در هر یک از مواد اولیه}}$$

رس‌ها به علت جذب سطحی و ظرفیت تبادل یونی بالا، بیشترین سهم را در ورود عناصر فرعی و فلزات سنگین، مانند کروم، وانادیم، سلنیم، لانتانیم، زیرکنیم، روبیدیم، آرسنیک و باریم به کلینکر سیمان نکاء دارند. همچنین عناصر مس، نیکل، کبالت و کلر بیشتر از طریق سنگ آهک وارد کلینکر شده‌اند.

برای محاسبه فازها و ترکیبات اجزای مرکب تشکیل دهنده سیمان پرتلند، معمولاً بر اساس مقادیر حاصل از آنالیز شیمیایی (جدول ۱) از روابط ۱ تا ۷ بوگه استفاده می‌شود [۱۷]. هرگاه محاسبه‌ی بوگه برای آنالیز سیمان به جای کلینکر به کار گرفته شود، بی‌تردید درصد گچ (حدود ۵٪) در محاسبات وارد خواهد شد. بنابراین این مقدار بر کل درصد آهک تأثیر می‌گذارد و میزان این تأثیر از روی کل سولفات تعیین شده در آنالیز مشخص می‌شود [۱۱]. آهک معادل مقدار SO_3 سیمان نکاء برابر با ۶٫۳۷ (SO_3 ×۰٫۷) خواهد شد. برای یک سیمان خوب ضریب اشباع آهک بین ۰٫۹۵-۰٫۸، مدول سیلیس بین ۳٫۲-۱٫۹ و مدول آلومینیوم بین ۲٫۵-۱٫۵ است [۷]. در جدول (۸) فازها و ترکیبات تشکیل دهنده سیمان پرتلند کارخانه‌ی سیمان نکاء، بنابر نتایج آنالیز شیمیایی جدول (۱) و در جدول (۹) مقایسه آن با استاندارد جهان ارائه شده‌اند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]

جدول ۷ سهم هر یک از مواد اولیه (٪) در محتوای عناصر جزئی کلینکر سیمان نکاء.

عناصر	آهک	خاک رس	سنگ آهن	سیلیس
Cu	۸۱٫۲۳	۱۲٫۹۷	۷٫۹۴	۰٫۸۷
Zn	۳۱٫۰۱	۴۲٫۶۴	۳٫۵۹	۲٫۲۷
Pb	۱۶٫۲۰	۷۵٫۹۱	۰٫۰۰۱۵	۷٫۷۶
Cr	۱۹٫۳۱	۸۴٫۰۳	۴٫۵۸	۲٫۳۸
Ni	۵۵٫۴۴	۴۲٫۷۱	۱٫۹۹	۵٫۱۹
V	۸٫۲۶	۷۷٫۸۹	۲٫۹۸	۱۰٫۵۹
Ce	۱۰٫۹۷	۸۴٫۱۴	۰٫۴۵	۴٫۴۵
La	۱۰٫۲۴	۸۵٫۰۶	۰٫۲۸	۴٫۴۸
Ga	۴۲٫۷۹	۴۷٫۸۴	۲٫۰۸	۷٫۳۵
Zr	۲۳٫۴۰	۶۶٫۸۷	۱٫۲۶	۸٫۴۵
Y	۲۴٫۲۲	۶۹٫۶۵	۰٫۶۷	۵٫۴۵
Rb	۲۹٫۵۵	۶۶٫۰۸	۱٫۲۳	۳٫۰۳
Co	۸۱٫۴۴	۱۵٫۶۱	۰٫۹	۲٫۰۳
As	۱۹٫۸۵	۷۰٫۸۱	۸٫۷۳	۰٫۶۲
Th	۴۱٫۳۰	۴۸٫۳۷	۲٫۶۷	۲٫۵۸
Cl	۶۷٫۸۶	۲۳٫۵۱	۲٫۱۷	۴٫۸۹
Ba	۱۱٫۶۱	۷۳٫۷۸	۸٫۹۵	۵٫۵۶
Sr	۴۶٫۷۲	۵۰٫۲۴	۱٫۷۰	۱٫۲۱

جدول ۸ ترکیب فازها و ترکیبات اجزای مرکب سیمان پرتلند نکاء.

فازها	LSF	SM	AM	C3S	C2S	C3A	C4AF
مقدار	۸۹٫۳۰	۲٫۶۲	۱٫۷۱	۴۶٫۲۳	۲۷٫۵۲	۸٫۶۹	۹٫۲۸

جدول ۹ مقایسه ترکیبات اجزای مرکب سیمان پرتلند نکاء با استاندارد جهانی[۲۳].

ترکیبات تشکیل دهنده سیمان پرتلند	C3S	C2S	C3A	C4AF
استاندارد جهانی تیپ II	۴۵ - ۶۵	۷ - ۳۰	۲ - ۸	۱۰ - ۱۲
استاندارد جهانی تیپ I	۵۰ - ۷۰	۱۰ – ۳۰	۳ – ۱۳	۵ – ۱۵
سیمان پرتلند نکاء	۴۶٫۲۳	۲۷٫۵۲	۸٫۶۹	۹٫۲۸

سیمان پرتلند تا میزان حداکثر ۲ درصد وزنی ترکیبات قلیایی در بر دارد. برای سیمان کم قلیا، مقدار قلیایی‌ها $(Na_2O)_e$ باید حداکثر ۰٫۶ درصد باشد. نسبت مولی Na_2O به K_2O برابر با ۰٫۶۵۸ است. بنابراین، مقدار $(Na_2O)_e$ به صورت معادل Na_2O طبق رابطه‌ی زیر حساب می‌شود [۶].

$$= 0/658\ K_2O + Na_2O(Na_2O)_e$$ (رابطه ۱۰)

مقدار این نسبت در سیمان نکاء برابر با ۱٫۳۲ است. مقدار قلیایی‌های موجود در سیمان نکاء، در گستره استاندارد جهانی قرار دارد اما نسبت به سیمان کم قلیا، قلیایی است. قلیایی بودن سیمان، علاوه بر کاهش کیفیت آن، می‌تواند آثار زیست محیطی نا مطلوبی داشته باشد.

با توجه به حجم زیاد غبار تولیدی در کوره‌ی سیمان و نیز انباشت آن در بیرون کارخانه و اثرهای زیست محیطی آن به

خاطر فلزات سنگین موجود در آن، در این بخش به بررسی غبار کوره‌ی سیمان نکاء، به عنوان مواد اولیه برای تولید سیمان بحث خواهد شد. به منظور استفاده از غبار کوره‌ی سیمان نکاء به بررسی ضریب اشباع آهک (رابطه‌ی ۱)، مدول سیلیس (رابطه‌ی ۲) و مدول آلومینیوم (رابطه‌ی ۳)، به عنوان پارامترهای مهم برای بررسی مواد خام سیمان، بر اساس آنالیز شیمیایی جدول (۱) طبق روابط بوگه پرداخته شد. در غبار کوره‌ی سیمان نکاء ضریب اشباع آهک برابر ۱۱۰/۹۵ درصد، نسبت سیلیس برابر ۱/۹۹ و نسبت آلومینوم برابر ۱/۲۹ است. کلینکر تولیدی از غبار کوره‌ی سیمان نکاء، با توجه به ضریب اشباع آهک، مدول سیلیس و مدول آلومینیوم دارای آهک آزاد خواهد بود و برای تولید کلینکر مرغوب، لازم است مدول سیلیس غبار کوره را با اضافه کردن خاک رس به غبار کوره به حد مطلوب رساند. بنابراین می‌توان با اضافه کردن خاک رس و رساندن مدول سیلیس به ۲/۱۵ - ۲/۳۰، از غبار کوره‌ی سیمان به عنوان مواد خام سیمان استفاده کرد. غبار کوره‌ی سیمان نکاء به علت دارا بودن مقدار قلیایی‌ها (Na_2O+K_2O) کمتر از ۱٪ و ترکیبات سولفوری پایین قابل برگشت به چرخه تولید سیمان است و می‌توان از آن به عنوان مواد اولیه‌ی سیمان استفاده کرد pH غبار کوره‌ی سیمان در آب ۱۰ تا ۱۳ است [۲۲]. هنگامی که این غبار روی سطح خاک‌های اطراف کارخانه فرو می‌نشیند، سبب قلیایی شدن خاک می‌شود. در شرایط قلیایی، فلزات سنگین موجود در خاک با تشکیل همبافت‌های هیدروکسیلی به راحتی در محیط منتقل می‌شوند. سیلیس بلورین نیز که پس از CaO بیشترین درصد را دارد، در صورت تنفس می‌تواند منجر به بیماری سیلیکوسیس شود. زمانی‌که کارگران، سیلیس بلورین را تنفس می‌کنند این غبار وارد حبابک‌های ریه شده و باعث تخریب گلبول‌های سفید می‌شود [۲۴]. عناصر جزئی Crو Pb در غبار کوره‌ی سیمان نکاء بیشتر از غلظت استاندارد مجاز برای مواد زائد خطرناک (CKD) آمریکاست. غلظت نیکل در غبار کوره‌ی سیمان نکاء بالاتر از استاندارد غبار کوره سیمان آمریکاست (جدول ۱۰). عنصر نیکل و عناصر کروم و سرب فلزات سمی و سرطان‌زا هستند [۲۵].

ضریب اشباع آهک غبار سیمان برابر ۸۵/۴۸ درصد، مدول سیلیس ۲/۶۴ و مدول آلومینیم ۱/۹۰ است. ترکیبات اجزای مرکب غبار آسیاب سیمان، عبارتند از تری کلسیم سیلیکات یا آلیت، دی کلسیم سیلیکات یا بلیت، تری کلسیم آلومینات و تتراکلسیم آلومینوفریت است. مقدار تری کلسیم سیلیکات به دست آمده از غبار آسیاب سیمان، برابر با ۳۶/۲۵ درصد وزنی، دی کلسیم سیلیکات برابر با ۳۷/۴۵ درصد وزنی، تری کلسیم آلومینات برابر با ۹/۸۷ درصد وزنی و تتراکلسیم آلومینوفریت برابر با ۸/۹۴ درصد وزنی براورد شده‌اند. با توجه به محاسبات انجام شده، غبار برگشتی بگ هوس آسیاب سیمان، ترکیبات مشابه سیمان داشته و می‌تواند وارد چرخه‌ی تولید سیمان شود.

جدول ۱۰ مقایسه عناصر جزئی (ppm) غبار برگشتی بگ هوس کارخانه سیمان نکا با غبار کوره سیمان آمریکا [۲۶] و نیز بالاترین غلظت مجاز برای مواد زائد خطرناک (CKD) استاندارد آمریکا [۱۳].

عناصر	غبار کوره سیمان نکا	میانگین غبار کوره سیمان آمریکا	بالاترین غلظت مجاز برای مواد زائد خطرناک (CKD) استاندارد آمریکا
As	۲	۲۳/۸	۵
Cr	۹	۴۱/۶	۵
Cu	۱۴	۳۰/۱	-
Pb	۸	۲۵۲/۹	۵
Ni	۴۰	۱۹/۳	۷۰
Sr	۱۲۹	۶۶۹	-
Zn	۳۵	۴۶۲	-
Ba	۵۲	۱۸۵/۵	۱۰۰
Th	۱۰	۴۰/۶	-

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]

برداشت

بر اساس روابط بوگه، فازها و ترکیبات تشکیل دهنده‌ی کلینکر و سیمان پرتلند در گستره‌ی استاندارد جهانی قرار دارند. رس‌ها به علت جذب سطحی و ظرفیت تبادل یونی بالا، بیشترین سهم را در ورود عناصر فرعی و فلزات سنگین؛ مانند کروم، وانادیم، سلنیم، لانتانیم، زیرکنیم، روبیدیم، آرسنیک و باریم به کلینکر سیمان نکاء دارند. همچنین عناصر مس، نیکل، کبالت و کلر بیشتر از طریق سنگ آهک وارد کلینکر می‌شوند. کلینکر تولیدی از غبار کوره‌ی سیمان نکاء با توجه به ضریب اشباع آهک، مدول سیلیس و مدول آلومینیوم، دارای آهک آزاد است و برای تولید کلینکر مرغوب، لازم است مدول سیلیس غبار کوره‌ی سیمان را با اضافه کردن خاک رس و رساندن مدول سیلیس به ۲/۱۵ - ۲/۳۰ به عنوان مواد خام سیمان استفاده کرد. غبار کوره‌ی سیمان نکاء به علت دارا بودن مقدار قلیایی‌ها (Na_2O+K_2O) کمتر از ۱٪ و ترکیبات سولفور پایین قابل برگشت به چرخه‌ی تولید سیمان است و می‌توان از آن به عنوان مواد اولیه‌ی سیمان استفاده کرد. با توجه به محاسبات انجام شده غبار برگشتی بگ هوس آسیاب سیمان، ترکیبات مشابه سیمان داشته و می‌تواند وارد چرخه تولید سیمان شود.

مراجع

[۱] لوخر ف.، *"تکنولوژی سیمان: تولید و کاربرد"*، ترجمه معطرخرازیا.م.،نشرطراح، (۲۰۰۶)۴۲۲صفحه.

[2]Davis H. E., *"Autogenously volume changes of concrete"*, Pross. ASTM 40,(1940)1103-1110.

[۳] معطرخرازی ا. م.، *"تکنولوژی سیمان کاربرد"*، نشرطراح، (۱۳۸۶) ۳۷۵ صفحه.

[۴] آهنگران ع.، *"شیمی سیمان پرتلند"*، ماهنامه فناوری سیمان، سال پنجم، شماره ۳۵، (۱۳۸۹) ص ۶۶ – ۵۸.

[۵] گلبهاریا.، *"اکتشاف و ارزیابی معادن مواد اولیه سیمان و بررسی های فنی و اقتصادی"*، پیک سیمان شماره۱۵۲(۱۳۸۹) ص۵۷-۶۴.

[6] Hewlett P.C., *"Lea's chemistry of cement and concrete"*, Fourth end Butter worth– Heinemann, Oxford, MA, USA (1998)1053.

[7] Ghosh S.N., *"Advances in cement technology; chemistry, manufacture and testing"*, second edition, publishing by tech books international, new dehli- 110019 India,(2002)804.

[8] Mindess S., Young. F., *"Concrete"*, prentice Hall Inco, Engle-wood cliffs, Newjersy (1981).

[9] Van Oss H.G., Padorani A.C., *"Cement and the environment; Part I – chemistry and technology"*, J. of industrial Ecology, vol. 6, no.1,(2003) 89.

[10] Campbell D. H., *"Microscopically examination and interpretation of Portland cement and clinker"*, Portland cement Association, unite states of American,(1999)2100.

[11] Taylor H. F. W., *"Cement chemistry"*, second edition, Thomas Telford, London,(1997)459.

[۱۲] طائب ع.، سادات نیا س.، *"بررسی عوامل موثر در کاهش ترکیبات مضر در غبار کوره سیمان به وسیله پخت آن در یک کوره آزمایشگاهی"*، ماهنامه سیمان، شماره ۶۰ ، (۱۳۸۰) ص۷.

[13] Dells J., Kanare H., Padiyara. S., *"Trace Metals in cement and Kiln Dust from North American cement plants"*, SP110, Portland cement Association, Skokie, IIIinois, USA (1991).

[14] Fierro M., *"Particulate Matter"*, (2000) 18.

[۱۵] درویش زاده ع.، *"زمین شناسی ایران"*، انتشارات دانشگاه امیر کبیر، (۱۳۸۰) ص۳۵۰.

[۱۶] عسگری ح.، *"گزارش کار آموزی سنگ معدن آبلو"*، (۱۳۸۳) ص۲۱.

[17] Bogue R. H., *"Calculation of Phase Composition, In The chemistry of Portland cement"*, Reinhold Publishing, New York, USA(1947)184-203.

[۱۸] بای ج. س.، *"سیمان پرتلند، ترکیب، تولید و ویژگی‌ها"*، ترجمه هورفر، قاسمی، شکری زاده، انتشارات دانشگاه تهران ۱۳۸۵، (۱۹۹۹)ص ۳۰۰.

[۱۹] عزیزیان م. ر.، *"تکنولوژی پخت سیمان"*، انتشارات کتاب دانشجو، (۱۳۸۵) ص ۴۷۰.

[20] Taylor H. F. W., *"Cement chemistry"*, published by Thomas Telford publishing, London E14-4 jd (2004) 55-57.

[21] Moir G. K., *"Limestone cement, gaining acceptance"*, International Cement Review (2003) 65-75.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.5.7]

[۲۲] شاهوران م.، مر. ف.، مرادیان ع.، *"اثرات زیست محیطی تولید سیمان"* ، مطالعه موردی کارخانه سیمان فارس، یازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۸۶) ص ۳۱۹۸ – ۳۲۰۶.

[23] Van Oss H.G., *"Background facts and issues concerning cement and cement data",* Open- file report 2005-1152.U.S. department of the interior, u.s. geological survey (2005).

[24] Mineo J., *"Silicosis in Construction Safety & Health Administration",* (2002) 5.

[25] Luckey T.D., Venugopal B., *"Metal toxicity in mammals",* 1.plenum press,N.Y (1977).

[26] Hugnes B., Kramer G., *"Characterization Of U.S.CKD, Bureau Of Mines Information Circular (IC)8885",* U.S.Department Of interior, Bureau Of Mines, Office Of Association Director, Mineral and Materials Research, Washington, D.C (1982).